CONGRÈS INTERNATIONAL DES MINES,
DE LA MÉTALLURGIE, DE LA MÉCANIQUE
ET DE LA GÉOLOGIE APPLIQUÉES

LIÉGE, 25 JUIN – 1er JUILLET 1905

SECTION DES MINES

BÉLIER PERFORATEUR HYDRAULIQUE

PAR

W. WOLSKI,

Ingénieur à Lemberg (Galicie).

S. A. IMPRIMERIE
H. VAILLANT-CARMANNE
RUE ST-ADALBERT, 8
LIÉGE — 1905

1re Question.

Bélier perforateur hydraulique

PAR

W. WOLSKI,

Ingénieur, à Lemberg (Galicie).

Forage hydraulique ; généralités.

Il n'est certainement pas de branche technique pouvant tirer plus d'avantages, de l'application de la transmission hydraulique de l'énergie, que l'art du forage.

En effet, lorsqu'on passe en revue ses différents domaines : sondages profonds, fonçage de puits, forage horizontal, perforation mécanique, il est difficile de ne pas partager la conviction que, dans l'avenir, le rôle prédominant y reviendra de droit à ce principe.

SONDAGES PROFONDS.

Dans tous les procédés connus de forage à percussion, le trépan est mis en mouvement au moyen d'une sonde, au bout de laquelle il est fixé.

Cette sonde, composée d'une série de tiges pleines ou creuses, est suspendue à un balancier, qui lui communique un mouvement oscillatoire vertical, se traduisant par une suite de chocs du trépan contre la roche.

Le principe du forage hydraulique est le suivant : une sonde tubulaire restant immobile, la colonne d'eau sous pression qui la traverse, actionne, au fond du trou, le trépan à l'aide d'un moteur approprié à cet usage ; puis l'eau remonte, emportant les détritus et curant le trou. La rotation et la descente graduelle du trépan s'effectuent automatiquement ou à volonté, à l'aide de la sonde dont il fait partie.

Une quantité d'avantages primordiaux se déduisent immédiatement de ce nouvel agencement. Puisque la masse considérable de la sonde, masse qui, dans tout sondage de quelque profondeur,

surpasse plusieurs fois celle de l'appareil de percussion (trépan et surcharge), ne prend part ni au mouvement continuel de va et vient, ni aux trépidations du choc,

1) On obtient une grande sécurité, en ce qui concerne la bonne marche de la perforation, car le système de tiges, restant immobile, n'est point assujetti aux ruptures, accident quotidien des sondages ;

2) On ménage les engins qui ne subissent plus de chocs, détériorant la sonde dont le fer devient friable et cassant, et ébranlant le mécanisme; le tubage ne souffre plus de l'usure, difficile à éviter dans tous les autres procédés de sondage à percussion ou à rodage ;

3) Il y a indépendance complète de la profondeur, les conditions mécaniques du mouvement du trépan ne changeant pas, qu'on opère à une profondeur de 10 ou de 1000 mètres ;

4) La transmission de l'énergie est avantageuse, car la force vive de la colonne d'eau, dirigée vers le fond du trou, sert exclusivement à actionner le moteur, sans se perdre en majeure partie en chocs inutiles, fouettement des tiges, etc. ;

5) Le curage du trou par l'eau sortant du moteur — curage très énergique — se produit spontanément, comme avantage accessoire, tandis que dans les autres procédés de forage, on emploie à cet effet des pompes spéciales et une machine à vapeur ;

6) On peut réaliser une augmentation presque illimitée de l'effet mécanique développé au fond du trou, duquel, comme on sait, dépend principalement le progrès du forage. Les procédés de forage actuels ne permettent, eu égard aux poids considérables mis en jeu, qu'un nombre restreint de coups par minute et la puissance de chaque coup présente une limite pratiquement infranchissable — que nous estimons à environ 450 *kgm/sec* (*6 chev. vap.*) [1]. Dans notre cas, où le travail se développe immédiatement à proximité du trépan et du fond du trou, une telle limite n'existe plus et l'on peut, à volonté, augmenter le nombre de coups, ainsi que leur puissance, rien que par un accroissement de la pression hydraulique et du débit des pompes. On obtient par ex. :

[1] Voir Appendice (1).

avec *5 l/sec* à *20 atm. : 1000 kgm/sec (13·3 chev. vap.)*
» *8 l/sec* à *25 atm. : 2000 kgm/sec (26·6 chev. vap.)*

7) Autres avantages pratiques : pendant la perforation, la sonde reste suspendue au câble de remonte et, par conséquent, n'a pas besoin d'être alternativement accouplée au balancier, puis découplée. On peut donc poursuivre la perforation, sans discontinuer, sur toute la longueur d'une tige (10 à 15 *m*), ce qu'il faut apprécier d'autant plus qu'une interruption du curage hydraulique entraîne le dépôt des parcelles désagrégées de la roche et nécessite un travail inutile lors de la reprise du forage. Ensuite, le balancier devenant inutile, on obtient une simplification du mécanisme, dont la construction devient plus légère par suite de la suppression des chocs, le montage plus facile, etc.

Fonçage des puits.

Le fonçage des puits, nécessité par les travaux d'exploitation de mines, s'exécute ordinairement à la main avec le secours des explosifs. Là où des sources abondantes ou bien des terrains mouvants excluent le travail à la main, et même lorsque la congélation artificielle n'est pas applicable (sources thermales, salées, etc.), le forage reste le moyen unique d'approfondissement des puits.

La technique de la perforation des puits n'a pas bénéficié, depuis un demi-siècle, de progrès notables. Malgré l'amélioration de plusieurs détails, on en est encore, comme au bon temps de 1850, aux engins à chute libre de Kind et Chaudron, consistant en un instrument extrêmement lourd (jusqu'à 30 *t*,), armé d'un grand nombre de tranchants, qui soulevé et lâché une quinzaine de fois par minute, broie le roc en retombant. La lenteur relative de la perforation, les mésaventures continuelles et de plus le prix élevé du mètre foré, conduisirent MM. E. Frieh et R. Nöllenburg, de Nordhausen, à choisir une voie différente. (Brevet allemand 158751, 15 avril 1903). Ils remplacèrent l'unique et puissant instrument à chute libre par un grand nombre d'appareils perforateurs indépendants (fig. 12) qui, fixés à un support commun *G*, sorte de chambre cylindrique, reçoivent entraînés par ce support un

mouvement de rotation continue. Ces appareils, mus d'une façon convenable, accomplissent la perforation. Un courant d'eau opère le curage du trou. L'eau arrive par la sonde *H*, puissante tige tubulaire, traverse le récipient *G*, cure le fond du trou et remonte le long des parois du puits. Les dimensions du récipient *G*, diminuant notablement la section libre, produisent une accélération de la vitesse qui facilite singulièrement le curage. Ce rétrécissement passé, la vitesse du courant diminue et les parcelles les plus lourdes de la roche désagrégée viennent se déposer dans une sorte de bassin de décantation *S* prévu *ad hoc* au dessus du récipient.

Les avantages principaux de ce nouvel agencement consistent : en une grande sécurité contre les ruptures, provenant de l'immobilité de la sonde ; dans la possibilité d'un accroissement presque illimité de l'effet mécanique transmis aux instruments de percussion ; enfin dans l'application d'un curage hydraulique très efficace qui, jusqu'à présent, n'a pas trouvé d'application dans le fonçage des puits, vu leur grand diamètre et la vitesse négligeable du courant. Ces avantages du nouveau procédé suffisent amplement pour fonder des espérances presque illimitées.

En ce qui concerne la force motrice, le brevet mentionne indifféremment électricité, gaz, air comprimé et force hydraulique ; mais un examen approfondi incline à croire que l'actionnement hydraulique des appareils perforateurs seul puisse être pris sérieusement en considération, et cela pour des raisons les unes évidentes au premier abord, les autres trop longues à exposer pour le moment. Nous nous bornerons à signaler les avantages extraordinaires d'une disposition qui réunit, en un tube unique, les tiges et la conduite de la force motrice et du curage hydraulique. C'est pourquoi les inventeurs, lors de la réalisation de leur idée, ont fait effectivement choix de la transmission hydraulique.

Forage horizontal.

On peut, de même, employer avec avantage le moteur hydraulique pour forer des trous horizontaux ou inclinés de grand diamètre, mais de profondeur relativement faible (trous d'aérage, d'écoulement des eaux, etc.), ou bien même pour percer des galeries entières, et cela d'autant mieux que l'on peut se servir

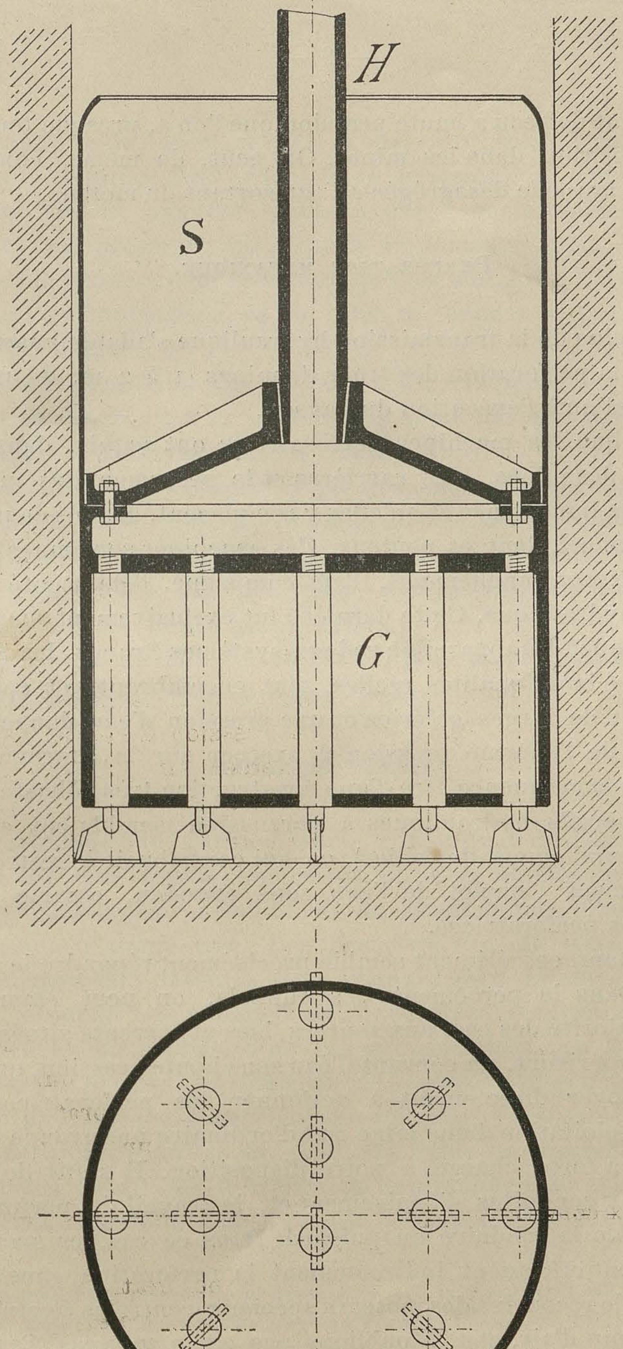


Fig. 12.

directement de l'eau à haute pression que l'on a, presque toujours, à sa disposition dans les mines. On peut, de même, confier le curage de la roche désagrégée à l'eau sortant du moteur.

Perforation mécanique.

Le principe de la transmission hydraulique s'adapte aussi, avec facilité, à la perforation des trous de mines (1 à 2 m. de profondeur), ainsi qu'à l'exécution du havage.

On sait que les machines perforatrices ont acquis, dans l'exploitation des mines, des carrières et le percement des tunnels, une grande importance et qu'elles y remplacent, de plus en plus, le travail manuel, lent et coûteux. Ces machines sont mues par la vapeur (exceptionnellement), l'air comprimé, l'électricité ou la pression hydraulique. Cette dernière fut exclusivement employée pour actionner des appareils à rodage (systèmes Brandt, Jarolimek) qui, malgré leurs qualités réelles, sont encombrants et coûteux, nécessitent de larges galeries et une pression d'eau dangereuse, par suite de l'énorme pression à exercer sur la couronne ; ils doivent en conséquence être d'une construction très robuste.

Les appareils hydrauliques à percussion semblaient exclus, (eu égard aux coups de bélier), ce qui contribuait à restreindre singulièrement l'emploi de l'eau sous pression, comme agent moteur des perforatrices.

Et pourtant cet élément semble précisément répondre le mieux au but. Dans le percement des tunnels, on peut emprunter dans la majorité des cas, aux sources, lacs et torrents situés à des niveaux supérieurs, un courant d'eau sous haute pression, que l'on peut employer directement à actionner les perforatrices. De même, l'exploitation d'une mine met d'ordinaire une grande quantité d'eau, à forte charge, à notre disposition. Il suffit de l'emprunter aux conduites d'épuisement et, le travail de perforation accompli, de la conduire au puisard. Dans ce cas, les machines d'épuisement effectuent indirectement la perforation, sans qu'on ait besoin de recourir à des moteurs spéciaux (centrales électriques, compresseurs d'air, etc). N'oublions pas qu'en tous cas, l'eau est indispensable pour le curage des trous forés, pour faciliter l'enlèvement des parcelles de roche, ainsi que pour abattre la poussière.

Ici la conduite de force motrice et celle de l'eau de curage sont réunies. Un mince filet d'eau sous pression, ou l'eau ressortant du moteur, peuvent servir à curer parfaitement le trou. Ceci surtout présente une grande importance dans les mines produisant beaucoup de poussière que les moteurs à air comprimé soulèvent en tourbillons, ce qui offre un danger sérieux pour la santé des ouvriers. (1)

Le côté le plus faible des moteurs à air comprimé est leur rendement médiocre (7 à 22 °/o de l'effet total développé sans tenir compte des résistances dans les conduites) (2).

Les machines électriques à percussion, mues par manivelle, fournissent, il est vrai, un rendement très satisfaisant, mais ne peuvent, jusqu'à présent, dépasser une certaine limite de travail (à peu près 3 chev. vap.) Du reste, elles présentent toujours du danger dans les mines grisouteuses.

Tous ces inconvénients et restrictions disparaissent, si l'on a recours à la transmission hydraulique.

Bélier perforateur.

Les avantages de la transmission hydraulique de l'énergie sont si évidents que depuis longtemps on s'est préoccupé, surtout pour les sondages profonds, de la construction d'un moteur hydraulique à percussion. Les premiers brevets concernant ce genre d'appareils datent à notre connaissance de 1867 (Balzberg) et 1880 (Hoppe). Les 10 dernières années firent connaître une foule de nouveaux dispositifs, dont aucun cependant n'a dépassé le domaine des projets. La difficulté de la construction d'un puissant moteur hydraulique à percussions réitérées — abstraction faite des dimensions réduites du trou, du sable en suspension dans l'eau et des conditions difficiles de fonctionnement qui excluent tout mécanisme compliqué — résulte principalement des propriétés

(1) La meilleure preuve de la gravité de cet inconvénient est que récemment les autorités de certains pays (Afrique méridionale, etc.) ont ouvert un concours pour l'invention, soit d'une perforatrice ne produisant pas de poussière, soit d'un appareil qui absorberait cette dernière. En cas de succès, ces appareils seront vraisemblablement rendus obligatoires.

(2) Voir Dolezalek : « Tunnelbau ».

physiques de l'eau, véhicule de l'énergie, fluide pondérable et presque incompressible. Chaque interruption ou renversement du mouvement est suivi infailliblement d'un choc, plus ou moins violent, de l'eau contre les parois des conduites et du moteur. L'intensité de ce choc (coup de bélier) augmente rapidement avec la vitesse et limite la rapidité de la percussion à 150 (au plus peut-être à 200) coups par minute.

Principe du bélier

Nous croyons avoir résolu le problème de la perforation hydraulique, d'une manière aussi simple qu'efficace, au moyen de notre bélier perforateur [1] qui permet d'obtenir 600, 1000 coups par minute et même plus d'une intensité voulue. Comme il était impossible d'éviter les coups de bélier, nous les avons utilisés. Le principe du bélier perforateur (le même que celui du bélier hydraulique qui sert à élever l'eau) repose sur le choc d'une colonne d'eau en mouvement, qu'on arrête subitement par la fermeture brusque d'une soupape, maintenue auparavant ouverte. La pression, fournie par une pompe, ne se transmet pas directement au trépan ; elle commence par imprimer une accélération à la colonne d'eau destinée à produire le choc ; ce n'est qu'à un moment précis qu'elle transmet, par un choc élastique, sa force vive au trépan.

La figure 1 est un croquis schématique de cet appareil. La colonne d'eau sous pression traverse le tuyau d'alimentation *D*, la chambre à air *B* et pénètre dans le tube de percussion *U*. Vers l'extrémité de ce dernier, la conduite se ramifie. D'un côté l'écoulement est arrêté par une soupape automatique *W*, maintenue ouverte par le ressort *f*, de l'autre par un obturateur à ressort *Z*. Enfin un piston *O*, qui joue en même temps le rôle de surcharge, est fixé au trépan et obture la troisième ramification. Un puissant ressort *F*, a pour but de rappeler la surcharge et le trépan à une hauteur convenable.

Le courant que la pompe envoie par les tiges, trouve d'abord une issue par la soupape *W* ouverte. Mais lorsque sa vitesse atteint une certaine valeur, il développe sur le clapet de la

[1] Brevet Wolski : Autriche 4010, Allemagne 135,322. France 303465. Angleterre 15017, Amérique 699273, etc.

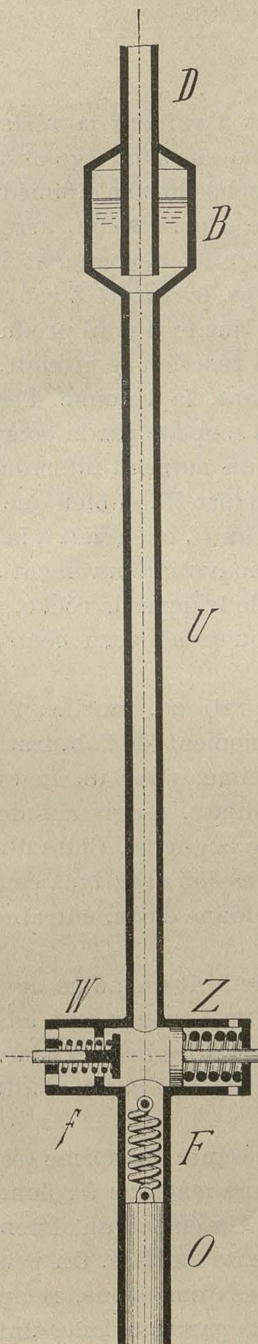
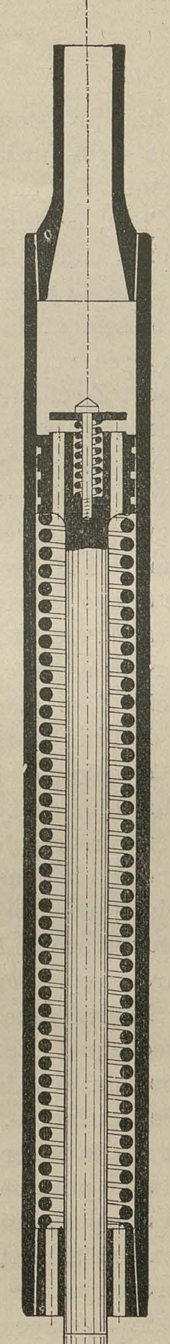


Fig. 1.


Fig. 2.

soupape une pression qui parvient à vaincre la résistance du ressort, de sorte que le clapet retombe sur son siège et intercepte l'écoulement. Un choc en est la conséquence immédiate. La colonne d'eau, contenue dans le tube à percussion, arrêtée subiment, donne contre le piston et projette violemment le trépan contre le fond du trou. En même temps, le ressort *Z* est comprimé par l'accroissement de pression. Dès que le travail produit a consommé la force vive de la colonne, la réaction se produit.

Le ressort *Z* refoule, en se détendant, la colonne d'eau. Il en résulte que la pression, exercée sur la soupape par la pompe et par l'air contenu dans la chambre *B* est un moment interrompue. Le ressort *f* en profite pour décoller le clapet *W*, si bien que l'écoulement redevient libre et la colonne d'eau *U*, obéissant à la pression de la chambre à air, recommence un nouveau mouvement accéléré. En même temps le trépan qui vient de frapper la roche, remonte, rappelé par le ressort *F*, jusqu'à ce qu'un nouveau coup de bélier lui fasse rebrousser chemin.

Le butoir *Z* se montre, dans la pratique, inutile ; l'élasticité naturelle de l'eau en tient lieu. Au moment de l'obturation de la soupape, la colonne d'eau se comprime, pour un instant, sous l'action du coup de bélier, puis se dilate, réagissant de bas en haut en sens inverse de la pression de la pompe. Cette diminution momentanée de la densité de l'eau (pression négative), contre-coup du choc élastique du piston et de la colonne d'eau, entraîne chaque fois la réouverture de la soupape.

La figure 2 représente schématiquement un autre agencement du bélier hydraulique, dans lequel la soupape est adaptée au trépan avec lequel elle effectue de concert les mêmes mouvements. La disposition des détails constructifs comporte d'ailleurs de nombreuses variantes.

En tout cas, le bélier perforateur présente une forme très simple (la plus simple possible peut-être) d'une machine à colonne d'eau, destinée à une percussion très rapide. Un clapet, un piston et deux ressorts en constituent les seuls éléments mobiles. On peut même, ce qui se recommande pour les petites dimensions, remplacer le clapet de la soupape et son ressort par une lame unique, en acier, analogue à l'anche des tuyaux sonores, ce qui en simplifie de beaucoup encore la construction.

L'application du bélier résout, d'une manière très simple, les difficultés de construction, provenant du diamètre restreint du trou foré. Puisqu'ici ce n'est pas la pression directe de la pompe, mais bien l'effort du coup de bélier (5 à 10 fois supérieur à la première) qui commande le piston, la surface de ce dernier peut être réduite à 1/5 ou 1/10. Un piston de 20 c^{m2} de surface (50 mm de diamètre) donne un effort utile de 2000 à 4000 kg.

Les procédés de forage actuels utilisent un poids de 500 à 1500 k. qui frappe la roche avec une vitesse modérée. Ici on obtient l'effet désiré avec des masses bien moindres, 30 à 70 k., mues à grande vitesse (au moins 4 *m/sec.* [1]) Il résulte, de ces efforts considérables et de ces petites masses, un développement très rapide de l'énergie, rappelant celle d'un coup de feu), et un nombre de coups (8 à 15 par seconde), qu'il serait impossible d'atteindre d'une autre manière.

L'ouverture et la fermeture de la soupape qui commande le mouvement, s'accomplit instantanément et presque sans chute de pression, chute inévitable dans tout système de commande mécanique. Les pertes assez importantes qui en résultent, sont donc supprimées.

Le procédé permet l'emploi des eaux troubles, sableuses ou salées qu'il est difficile d'éviter dans tout curage hydraulique.

La soupape de commande étant toujours ouverte lorsque le moteur est à l'arrêt, on peut passer, à volonté, du forage au simple curage [2] et les tiges qu'on dévisse pour la remonte de l'appareil sont toujours vides.

L'intensité du coup de bélier, et partant de la percussion, peut-être réglée à volonté :

1) par un ajustement approprié de la soupape ;

2) par la longueur du tube de percussion.

Le coup de bélier.

A notre connaissance, nous avons été le premier, en 1900, dans le Journal de l'Association Polytechnique de Léopol (Lemberg) [3],

[1] Sur la différence qui s'ensuit dans l'action du trépan sur une roche dure, voir mon Etude sur la surcharge (Uber die Bohrstange) : « Glückauf» (Essen) 1901 n° 11.

[2] Voir ci-dessous le chapitre : Quantité et pression d'eau requises.

[3] „Czasopismo techniczne" 1900 n^{ro} 25.

à établir et exposer d'une manière scientifique les lois qui régissent le phénomène du coup de bélier. Nous reproduisons ici les résultats principaux de cette théorie, en y ajoutant cette remarque que les mesures directes ont présenté une concordance surprenante avec les chiffres déduits de la théorie.

Comme on le sait, l'eau est un fluide élastique qui, à la pression d'une atmosphère, se contracte de $\frac{48}{1.000.000}$, c'est-à-dire en chiffres ronds de $\frac{1}{20.000}$ de son volume primitif. [1] Une colonne d'eau, contenue dans un tube, représente une suite élastique de particules uniformément réparties. Lorsqu'une telle colonne, affectée d'une vitesse c, rencontre un obstacle fixe, le choc qui s'ensuit, produit une contraction, ainsi qu'un accroissement de pression, qui se propage de proche en proche dans la colonne. La grandeur de l'effort A en atm. dépend uniquement de la vitesse du choc c ; elle est tout-à-fait indépendante de la longueur de la colonne. [2]

$$A = 14.43\ c \qquad \text{I.}$$

Dans le cas où l'obstacle n'est point fixe, mais cède avec une vitesse v, la pression développée par la colonne d'eau n'est que

$$A = 14.43\ (c - v) \qquad \text{II.}$$

La contraction, comme une onde élastique, se propage dans la colonne, de couche en couche, et d'avant en arrière, avec une vitesse

$$V = 1443\ m/sec, \qquad \text{III.}$$

c'est-à-dire avec la vitesse du son dans l'eau.

Lorsque l'onde élastique a parcouru toute la longueur L de la colonne, il se produit à l'extrémité libre de celle-ci, c'est-à-dire à la limite de deux milieux de densités différentes, une réflexion de l'onde. L'effort, développé par le coup de bélier se transforme subitement en une vitesse équivalente avec laquelle les dernières couches de la colonne et successivement les suivantes sont refoulées. Selon l'expression consacrée de l'acoustique, l'onde de contraction, répercutée en onde de dilatation, annule successivement par

(1) L'élasticité des parois de la conduite n'augmente la compressibilité de la colonne d'eau que de quelques millionnièmes.

(2) Voir Appendice (2).

interférence, la contraction du liquide, jusqu'à ce que tout l'effort soit absorbé et se transforme en vitesse équivalente. La colonne d'eau refoulée s'éloigne de l'obstacle avec la même vitesse c. Il en résulte une raréfaction égalant en grandeur la contraction précédente [1].

L'effort exercé par le coup de bélier, a donc duré le temps nécessaire à l'onde élastique pour parcourir la colonne dans les deux sens. Le coup de bélier dure en secondes :

$$T = {}^{1}/_{722}\, L \qquad \text{IV.}$$

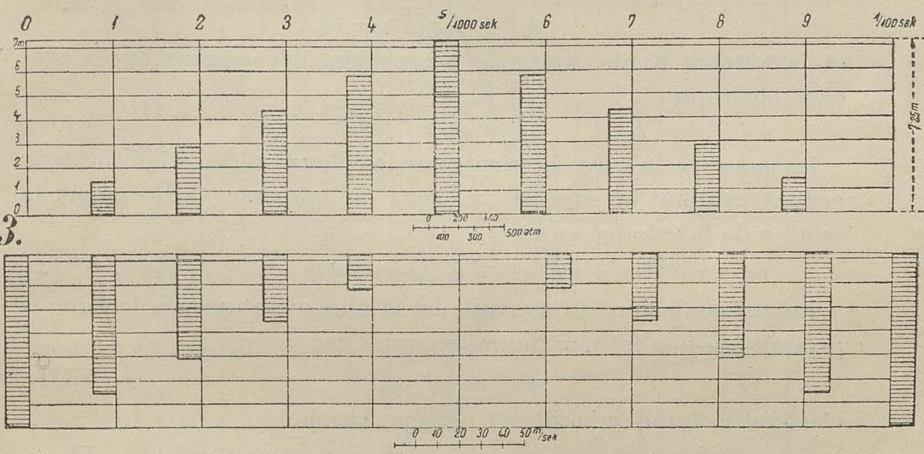


Fig. 3.

La figure 3 représente graphiquement les différentes phases de ce phénomène. On y a représenté une colonne d'eau haute de 7 *m* 22, dans des espaces de temps différant de ${}^{1}/_{1000}$ seconde, comptés depuis le moment du choc contre un obturateur fixe. La vitesse du choc adoptée est $c = 12$ *m/sec*. La rangée supérieure représente, à l'échelle indiquée, les tensions développées à chaque instant dans chaque partie de la colonne ; savoir : à gauche, les tensions positives (pressions), à droite, les tensions négatives (raréfaction). La rangée inférieure représente, à une autre échelle, les vitesses de chaque partie de la colonne, et de même : à gauche, les vitesses positives (de haut en bas), à droite les vitesses négatives (de bas en haut).

[1] Il est entendu que cette raréfaction ne peut atteindre qu'une valeur limitée par la pression environnante, donc 1 atm. au niveau du sol, 51 atm. à 500 m. de profondeur, etc. Si elle dépassait cette limite, la colonne d'eau rebondirait tout entière contre l'obstacle : il se produirait un vide.

Ainsi que le diagramme le montre, après un choc contre un obstacle fixe, la colonne ne perd rien de sa force vive ; elle ne fait que renverser la direction de son mouvement

$$c' = -c, \qquad \text{V.}$$

ce qui est évident ; car, le choc étant élastique, il ne s'est pas produit de travail extérieur. Il en est tout autrement, lorsque l'obturateur cède pendant le choc, avec une vitesse constante v. Alors l'effort (comme il en est fait mention plus haut) n'a plus que la valeur

$$A = 14{\cdot}43\ (c - v)$$

et la vitesse finale, après la percussion, est (comme après tout choc élastique)

$$c' = -c + 2v \qquad \text{VI.}$$

La quantité de travail fournie par la colonne d'eau, à l'obturateur cédant pendant la percussion, sera en mkg/sec (Q désignant la section de la colonne en cm^2) :

$$E = 14{\cdot}43\ Q\ (c-v)\ v \qquad \text{VII.}$$

La transmission du travail est la plus avantageuse, lorsque le produit $(c-v)\ v$ est maximum, ce qui a lieu pour

$$v = {}^1/_2\ c, \qquad \text{VIII.}$$

c'est-à-dire lorsque la vitesse de répercussion

$$c' = 0 \qquad \text{IX.}$$

Après le choc, la colonne d'eau reste immobile, ayant livré toute sa force vive à l'obturateur cédant, par ex. à un piston. C'est ce que représente la figure 4.

Fig. 4.

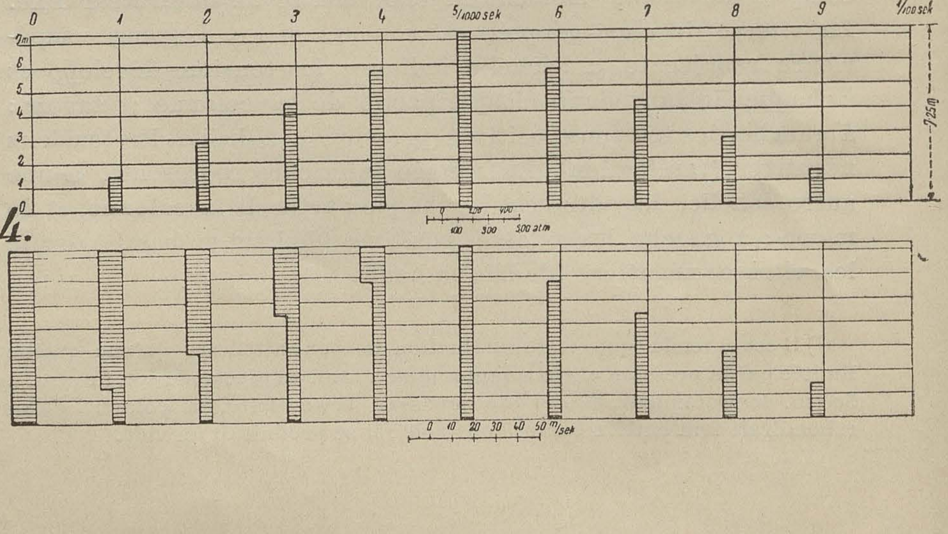
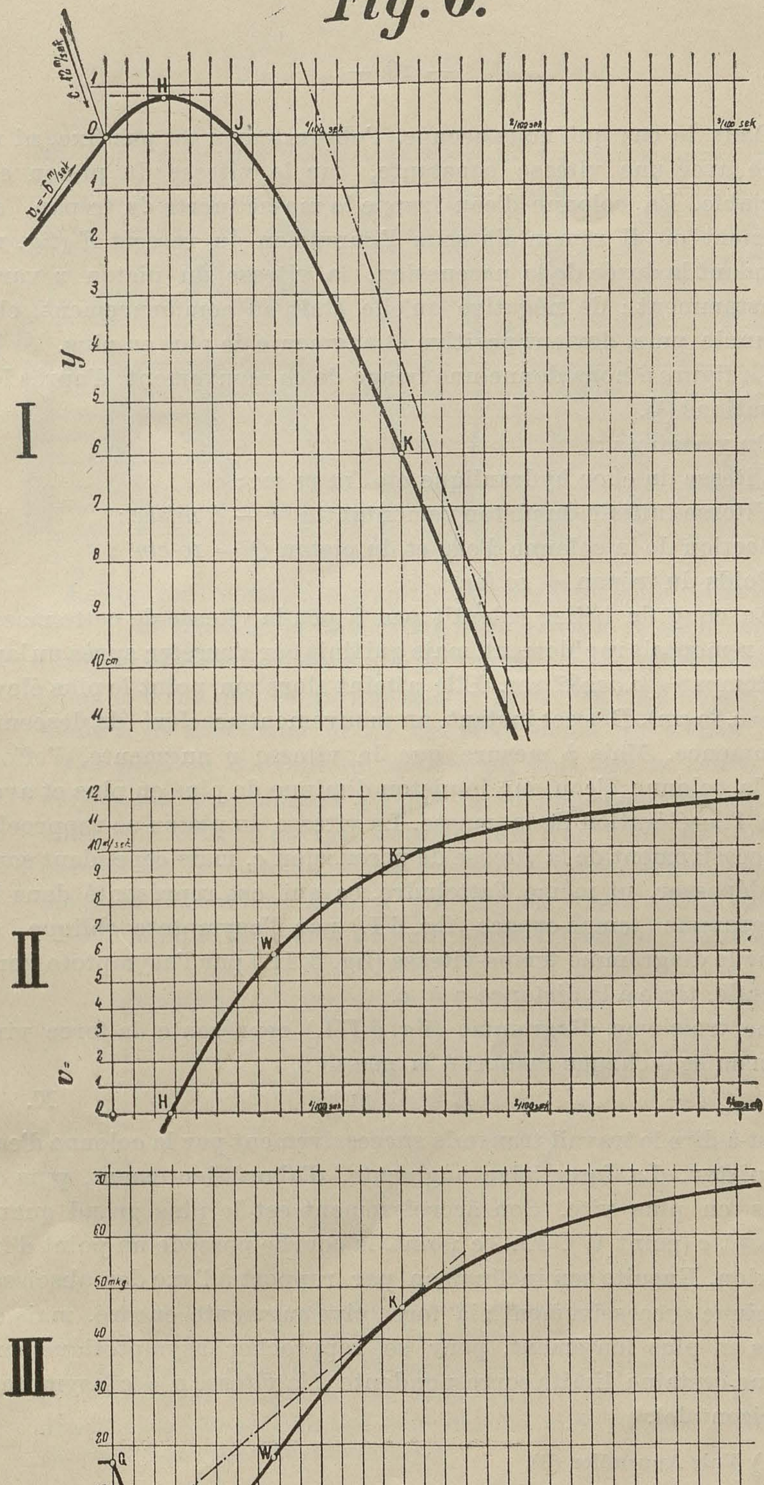


Fig. 6.



Dans le cas qui nous occupe, l'obturateur n'est pas fixe, ni ne cède avec une vitesse constante, car la vitesse du piston est variable. La colonne d'eau frappe la masse inerte du trépan, au moment où il remontait sous l'impulsion du ressort *F* (fig. 1). Pendant la durée de la percussion, la vitesse du piston v varie constamment ; de négative qu'elle était au commencement, elle s'annule puis, devient positive et augmente de plus en plus.

La figure 6 nous donne une image de ce mouvement d'après les équations (1).

On y a admis :

Vitesse du choc hydraulique $c = 12\ m/sec$;

Vitesse initiale du piston remontant $v = -6\ m/sec$;

Section de la colonne d'eau et du piston $Q = 10\ cm^2$;

Poids du trépan $= 10\ kg$.

Le coup de bélier ralentit peu à peu la vitesse de cette masse qui remontait rapidement, mais qui finit par s'arrêter après un laps de temps $= 0.00285\ sec$. Elle atteint alors son point le plus élevé ($y = 0.80\ cm$). Dès cet instant, un mouvement accéléré de descente commence. Mais à mesure que la vitesse v augmente, l'effort de la colonne d'eau sur le piston diminue de plus en plus et avec elle l'accélération de la masse. La vitesse du piston se rapproche successivement de la vitesse de percussion c, mais cependant sans la dépasser, ni même l'atteindre, ce qui est représenté dans le diagramme temps-espace (fig. 6 I.) par l'asymptote oblique, et dans le diagramme temps-vitesse (fig. 6 II.) par l'asymptote horizontale, tirée à la distance $v = c$.

Le troisième diagramme (fig. 6 III.) représente la force vive transmise à chaque instant à la masse :

$$E = {}^1/_2\ m\ v^2 \qquad \text{X.}$$

c'est-à-dire le travail transmis successivement par la colonne d'eau au piston. La force vive augmente, d'abord lentement, puis de plus en plus vite. Son accroissement est le plus grand quand $v = {}^1/_2\ c$ (point W). En ce point, la courbe possède un point d'inflexion. Ensuite son inclinaison par rapport à l'axe des abscisses diminue successivement ; la force vive augmente encore, mais de plus en plus lentement, pour se rapprocher asymptotiquement d'une certaine limite correspondante à la vitesse $v = c$ (asymptote horizontale).

(1) Voir Appendice (3).

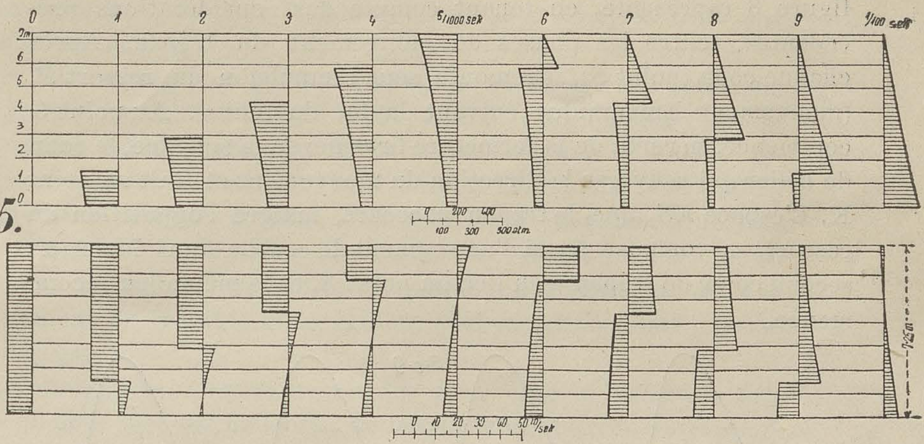


Fig. 5.

La figure 5 représente graphiquement, à des intervalles de temps de $^1/_{1000}$ de seconde, la répartition de la tension et de la raréfaction (rangée supérieure), ainsi que les vitesses (rangée inférieure) d'une colonne d'eau qui frappe une masse inerte. On y a admis 7,2 mètres hauteur de la colonne et 7,2 kg. pour poids du trépan (1). pour

On peut se convaincre facilement, soit par le calcul, soit au moyen des diagrammes (2) que la somme d'énergie potentielle, ainsi que celle d'énergie actuelle du trépan et de toutes les parties de la colonne, d'eau reste constante, avant, pendant et après la percussion. Il n'en pouvait être autrement, puisqu'un choc élastique ne cause aucune perte d'énergie. Le diagramme

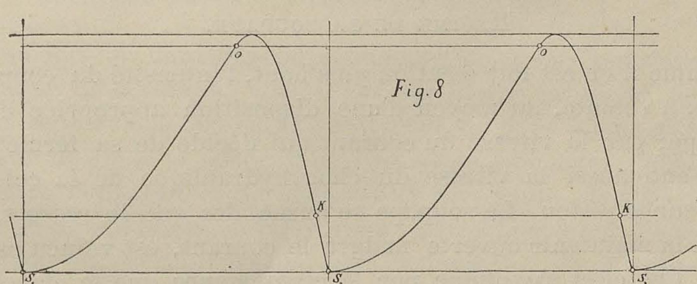
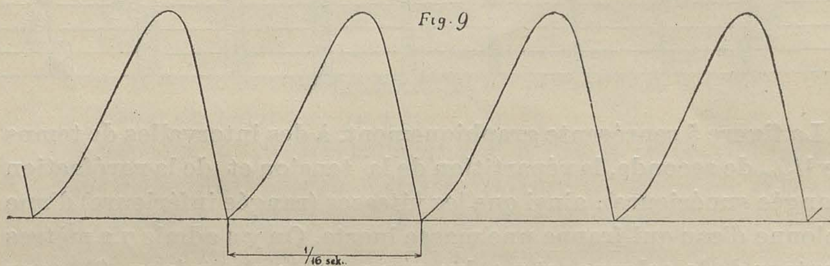


Fig. 8

(1) Voir ci-dessous le chapitre concernant la relation qui existe entre le poids du trépan et la longueur de la colonne d'eau.

(2) La tension et la vitesse des molécules de l'eau sont équivalentes. Il n'y a lieu de tenir compte ici que de la somme d'énergie dont la grandeur dépend de la vitesse, mais non de la direction ni du signe de la déformation élastique (contraction et raréfaction).

figure 8 représente, en tenant compte des considérations précédentes, toutes les phases du mouvement du trépan. Après chaque coup (point S), il remonte sous l'impulsion du ressort F, (mouvement harmonique suivant la loi du sinus). Au point O commence, en vertu de la fermeture brusque de la soupape, le coup de bélier qui renverse la direction du mouvement et finit au point K. L'espace KS_2 que le trépan parcourt, malgré l'opposition du ressort, se compose aussi d'un segment de courbe sinusoïdale ; un second coup de trépan a eu lieu au point S_2 et le même jeu recommence.



La figure 9 est un fac-simile (grandeur naturelle) d'un diagramme obtenu directement sur l'appareil. La forte inclinaison initiale de la courbe, immédiatement après le choc, s'explique par le fait du rebondissement du trépan qui, lors de l'expérience, portait contre un corps en acier trempé. Dans la roche même la plus dure, ce rebondissement est à peine perceptible.

Régime de la soupape.

Comme il en est fait mention plus haut, l'intensité du coup est réglée, à volonté, au moyen d'une disposition appropriée de la soupape ; car la vitesse du courant qui décide de sa fermeture, représente aussi la vitesse du choc hydraulique de la colonne d'eau sur le piston. La soupape se ferme, dès que le ressort, qui tend à la maintenir ouverte malgré le courant, est vaincu par sa force. Cet effet s'explique par la circonstance que le clapet, se trouvant peu éloigné de son siège, présente un rétrécissement, par lequel l'eau se fraie passage à grande vitesse. Il résulte de cet accroissement total de la vitesse une différence de pression sur les deux faces du clapet, différence représentant une surcharge d'en haut qui, augmentant en raison du carré de la vitesse

d'écoulement, comprime de plus en plus le ressort et finit par vaincre sa tension.

La loi qui régit ce phénomène est la suivante [1] : nommons « distance normale » celle qui sépare le clapet de son siège, quand le ressort est détendu. Au fur et à mesure que la vitesse du courant augmente, cette distance décroît lentement, tant que la déformation n'a pas dépassé le tiers de cette distance. Une fois cependant que la distance du clapet est réduite aux 2/3 de la distance normale, l'équilibre, de stable qu'il était, se change subitement en instable et le clapet, violemment projeté, ferme la soupape.

La vitesse du courant nécessaire pour que le choc ait lieu dépend donc de deux facteurs : de la puissance du ressort (rapport entre sa résistance et sa déformation) et de la distance normale du clapet. La puissance du ressort influe sur l'intensité du choc en raison directe de sa valeur, la distance normale en raison de son cube [2].

Lorsqu'un butoir limite le jeu du clapet, de telle façon que le ressort, dès le commencement, soit un peu comprimé, cela n'exerce aucune action sur la force du coup de bélier, pourvu que la déformation initiale ne dépasse pas le tiers de la distance normale; un abaissement plus grand du butoir diminuerait la force du coup de bélier et donnerait au courant un étranglement tout à fait inutile.

Hauteur de la colonne percutante.

Le second facteur dont dépend l'intensité du coup, consiste dans la hauteur de la colonne d'eau, car elle limite la durée de l'effort qui agit sur le piston. Il est évident qu'il ne s'agit pas de la hauteur de toute la sonde tubulaire, mais seulement de la distance entre l'appareil et la chambre à air. Cette dernière, présentant un milieu élastique, interrompt en effet la colonne d'eau incompressible et répercute les ondes de compression, de la même manière qu'en acoustique le son est répercuté à l'extrémité d'un tuyau sonore.

Il s'agit donc de choisir la longueur la plus avantageuse de cette colonne ; car lorsqu'elle est trop courte, le coup de bélier est

(1) Voir Appendice (4).
(2) Voir Appendice (5).

interrompu trop tôt et le trépan ne reçoit qu'une fraction de la force vive de la colonne. Au contraire, si celle-ci est très longue, la durée du coup est prolongée, de telle manière que la vitesse de la masse frappée se rapproche de la vitesse de la colonne percutante, si bien que, vers la fin du choc, l'action exercée sur le piston devient insignifiante. Les deux cas doivent être considérés comme désavantageux et la longueur du tube de percussion doit être choisie de telle sorte que la plus grande partie de la force vive de l'eau se transmette au trépan ; c'est ce qui a lieu lorsque la masse de la colonne percutante est égale à la masse du trépan frappé ([1]). On comprend qu'il ne s'agit pas d'une égalité absolument rigoureuse, difficile à atteindre, mais qu'une égalité approchée comporte déjà une transmission satisfaisante de l'effort.

Les diagrammes (fig. 5 et fig. 6 III) nous apprennent, du reste, que la colonne d'eau, travaillant même dans les conditions les plus favorables, ne transmet pas au trépan plus des *2/3* environ de son énergie primitive et conserve le reste, sous forme de vitesse et de déformation, pour l'employer en majeure partie, à sa propre répercussion.

Si la section du piston n'est pas identique à celle de la colonne d'eau, mais est α fois plus grande, le choc s'effectue comme si, les sections étant les mêmes, la masse du trépan était, par compensation, α^2 fois moindre ([2]). Conformément à cette donnée, il faut réduire dans le même rapport la hauteur de la colonne percutante. Lorsque, d'autre part, le trépan et le piston étant donnés, on augmente β fois la section de la colonne d'eau, il faut augmenter sa hauteur dans le même rapport ; car alors le volume de l'eau deviendra β^2 fois plus grand et sa vitesse β fois moindre, donc sa force vive au moment du choc restera la même. La différence dans l'effet produit ne consistera qu'en ce que la percussion exercera sur le piston une pression β fois plus petite, mais qui durera β fois plus longtemps.

Quantité d'eau et pression requises.

La quantité d'eau nécessaire pour actionner le trépan est de

([1]) Voir Appendice ([6]).
([2]) Voir Appendice ([7]).

beaucoup inférieure à celle qu'on est obligé d'envoyer dans l'appareil pour le mettre en mouvement. Cette quantité répond effectivement à la plus grande vitesse d'écoulement possible, c'est-à-dire à celle qui occasionne la fermeture de la soupape, tandis que l'appareil en marche ne consomme que la quantité moyenne des trois phases différentes, écoulement libre, percussion et répercussion.

Des considérations mathématiques, ainsi que des observations directes, établissent que cette quantité moyenne ne représente que le tiers à la moitié de la quantité d'eau maxima requise. Il en découle une propriété très avantageuse du bélier perforateur. On peut, au début, envoyer dans l'appareil une grande quantité d'eau (le double ou le triple de la quantité ordinaire) sans commencer pour cela le travail du forage proprement dit. L'eau s'écoule simplement sans obstacle et presque sans surpression par la soupape et ne fait que curer le trou. Ce n'est que lorsque le débit atteint la quantité nécessaire pour la fermeture de la soupape que l'appareil se met en mouvement : la tension augmente et la quantité d'eau envoyée dans la sonde tombe de $^1/_2$ à $^1/_3$ de sa valeur primitive. On est ainsi en état, à chaque instant, de remplacer, le cas échéant, le forage par un curage énergique, ce qu'on ne saurait trop apprécier dans les sondages profonds.

La pression exercée par la pompe règle le temps nécessaire pour fournir à la colonne d'eau la vitesse nécessaire à la fermeture de la soupape. Le nombre de coups par seconde dépend, par conséquent, de la pression fournie par la pompe. Lorsque cette pression varie, le nombre de coups varie avec elle, mais non l'intensité de chacun d'eux, de même que la quantité d'eau nécessaire ne varie pas. Cette quantité ne dépend que de la soupape.

Le produit de la quantité d'eau par la pression nous donne la mesure de la quantité totale de travail développé.

On connaît ainsi tous les éléments qui définissent la marche de cet appareil, c'est-à-dire la course du trépan, l'intensité et le nombre de coups, et rien n'est plus facile que de l'accommoder à toutes les conditions que peut présenter le forage.

Pertes et rendement.

Les déperditions partielles de l'énergie peuvent avoir trois causes différentes :

1. Manque d'étanchéité ;
2. Résistances dans les conduites ;
3. Frottement du piston.

Les fuites dans la sonde tubulaire sont faciles à constater et à éviter. Un raccord soigné à vis conique, graissé au suif, fournit une étanchéité presque absolue. En tout cas, la somme des pertes provenant de ces fuites est toujours négligeable et le rapport du volume d'eau, fuyant par les joints vicieux, à la quantité d'eau totale débitée par pompe, donne le pourcentage de déperdition. Toute fuite dans le tube à percussion ou au-dessous dans l'appareil lui-même, représente une perte bien plus grave, puisque les efforts provenant du coup bélier (100 à 300 *atm*) sont incomparablement plus grands que ceux qui sont exercés par la pompe (10 à 25 *atm*). En présence de tels efforts, se transformant 10 à 15 fois par seconde de négatifs en positifs, la réalisation de l'étanchéité est hérissée de difficultés. En outre, toute fuite occasionne non seulement une diminution sensible de l'effet utile, mais exerce encore une action nuisible sur la marche de l'appareil ; car le refoulement de la colonne d'eau, indispensable pour la réouverture de la soupape, ne se produit pas. On peut comparer ce phénomène à la manière dont se comporte un corps élastique qui rebondit sur le pavé, mais non sur un terrain mou, dans lequel il s'enfonce un peu, consommant ainsi sa force vive. Le calcul démontre qu'une fuite, dont la section ne représente guère plus de quelques centièmes de la section totale de la colonne percutante, suffit déjà pour consommer toute sa puissance vive, qui se perd en un travail inutile de l'eau se frayant passage par cette étroite fissure. Il n'y a plus alors de possibilité de répercussion régulière et l'appareil reste immobile, soupape close [1]

Heureusement la préservation des seuls endroits délicats de l'appareil où les fuites peuvent se signaler (soupape et piston), ne présente pas de sérieuses difficultés, si on leur donne une forme et une matière convenables. Un piston pourvu d'une rondelle de cuir emboutie présente une étanchéité absolue. La soupape qui s'est le mieux comportée, consiste en une mince plaque annulaire, élastique, d'acier trempé reposant sur un siège de même métal.

[1] Pour le remettre en mouvement, il suffit d'arrêter un instant la pression de la pompe.

Les résistances du frottement de l'eau dans une conduite augmentent, comme on sait, en raison directe de la longueur de cette conduite, du carré du volume d'eau qui s'écoule et en raison inverse de la 5me puissance du diamètre.

$$A_1 = 2.1\, L\, \frac{W^2}{d^5} \qquad \text{XI.}$$

(A_1 en *atm.*, L en *m.*, W en *l/sec*, d en *cm*)

Lorsque la pompe fonctionne à une pression de A *atm.*, la perte par les frottements dans la sonde (par rapport au travail total) est :

$$\frac{E_1}{E} = \frac{A_1}{A} \qquad \text{XII.}$$

Il s'ensuit qu'il faut choisir le plus grand diamètre possible. Ayant adopté par ex. $W = 4\ l\ sec$, $d = 7\ cm$, on subit, tous les cent mètres, une perte de 0.2 *atm.*. Lorsque la pression fournie est de 20 *atm.* et la profondeur atteinte de 600 *m*, cela représente une perte de 6 %.

Une perte est de plus occasionnée par la résistance que l'eau rencontre dans le tube à percussion et par l'étranglement de la soupape. Ces résistances cependant ne sont pas constantes, elles varient considérablement avec la vitesse de la colonne d'eau. Appelons A_2 la pression nécessaire pour amorcer l'appareil (somme des résistances maxima du tube de percussion et de la soupape), la moyenne de l'effet utile ainsi perdu est, avec une approximation suffisante (1) :

$$\frac{E_2}{E} = {}^1/_2\, \frac{A_2}{A} \qquad \text{XIII.}$$

Afin de réduire cette perte le plus possible, il est recommandable :

1. D'obtenir, par l'ajustement de la soupape, un coup de bélier puissant plutôt par une grande distance normale que par l'emploi d'un ressort trop fort ;

2. De prendre la section du tube à percussion (2) et par conséquent sa longueur plutôt un peu grande que trop petite, car la longueur n'augmente le frottement qu'en raison directe de sa

(1) Voir Appendice (8).

(2) Voir plus haut au chapitre « Hauteur de la colonne percutante », la relation entre la section et la longueur du tube à percussion.

valeur ; la section, au contraire, en raison inverse de sa puissance $2\ ^1/_2$; donc la déperdition de l'effet utile diminue avec la puissance $1\ ^1/_2$ de la section, c'est-à-dire avec le cube du diamètre.

Supposons par ex. le diamètre intérieur du tuyau de 40 *mm.* ($Q = 12.5\ cm_2$), $L = 20\ m$, $W_2 = 10\ l/sec$; dans ce cas, la colonne d'eau présente à l'écoulement une résistance maxima de *4 atm.*, la perte par la soupape d'un tel appareil est à peu près 0.5 *atm.*, ensemble $A_2 = 4.5\ atm$. Lorsque la pression fournie par la pompe monte à 20 *atm.*, cette perte représente 11 % de l'effet développé.

Le frottement du piston dans le cylindre ne se laisse pas évaluer avec exactitude : il dépend du genre de la garniture, ainsi que de la quantité de sable contenue dans l'eau. Lorsqu'on emploie une rondelle de cuir, nous l'évaluons à environ 10 % ; dans le cas de cercles métalliques, à moins encore ; il est minimum dans le cas d'un long piston, parfaitement tourné, pourvu de gorges.

Les résistances passives représenteraient donc, dans les conditions choisies, 27 % de l'effet total produit par la pompe et le rendement serait de 73 % [1].

Le travail nécessaire à la déformation du ressort ne constitue aucune perte, attendu que, par sa détente, il rend chaque fois cet effort sous forme de vitesse à la masse du trépan, qui la transmet par choc élastique à la colonne d'eau, de sorte que la quantité moyenne d'eau consommée en est diminuée.

Pour couper court à tout malentendu, nous remarquerons ici que le choc hydraulique, sur lequel se base la construction du bélier perforateur, n'a rien de commun avec les chocs que l'on cherche à éviter si soigneusement (par ex. dans les roues hydrauliques), précisément eu égard à la perte d'effetutile. Là, il s'agiten effet d'un jet d'eau libre qui rejaillit et se disperse, de sorte que son énergie se dissipe de toutes parts. Ici, au contraire, nous avons une colonne qui sous le choc, de même que tout corps élastique, n'éprouve aucune perte de son énergie.

Sondages profonds au bélier.

Lors de l'application du bélier aux sondages profonds, il s'agissait de l'approprier aux conditions données (diamètre restreint et longueur indéfinie du trou). L'écoulement de l'eau devait s'effectuer

[1] D'après les expériences d'Eytelwein, le bélier hydraulique, employé à l'élévation de l'eau, travaille avec un effet utile de 70 à 90 %.

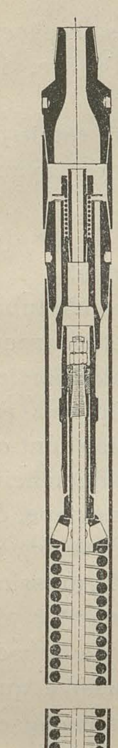


Fig. 10.

dans l'axe et le plus près possible du fond du trou, la rechange de trépan être aisée et l'appareil entier, robuste, simple et facile à démonter. La forme de l'appareil, représenté figure 10 répond à toutes ces exigences. Le siège de la soupape y a reçu la forme d'un cylindre en acier, pourvu d'un trou central, autour duquel est disposée une couronne de trous parallèles. Une mince plaque annulaire, en acier trempé, constitue le clapet et ferme ou ouvre ceux-ci simultanément. Le ressort est logé dans un élargissement cylindrique du trou central. On peut régler, à volonté, l'action de ce ressort en mettant dessous des anneaux en acier de différentes épaisseurs. Un bout de tube sert de guide au clapet ; un écrou avec contre-écrou qu'on peut serrer ou desserrer à volonté, limite sa course, en lui servant de butoir.

Le clapet ouvert, l'eau s'écoule librement par les trous disposés en couronne, longe les parois d'un tuyau-enveloppe, ainsi que celles de la gaîne du trépan, cure ce dernier, de même que le fond du trou, puis remonte. Au moment de la fermeture de la soupape, la pression du contre-coup se propage, par le tube guide du clapet, jusqu'au cylindre en acier trempé dans lequel se meut le piston. Le trépan (ici on a fait choix d'un trépan excentrique en gradin) est fixé à une longue tige, par un joint à boulet, afin d'éviter les flexions. Sa partie cylindrique (la surcharge) est guidée par quatre saillies longitudinales de la gaîne ; sa lame se meut dans deux échancrures de cette dernière, de sorte que la rotation de la sonde entraîne celle du trépan.

Cette gaîne constitue, en même temps, le point d'appui du puissant ressort, qui rappelle le trépan et le piston. Il suffit donc de dévisser cette gaîne pour pouvoir retirer toutes les pièces faisant partie de l'appareil (le piston avec sa rondelle de cuir, le ressort, etc.), les examiner et les remplacer éventuellement.

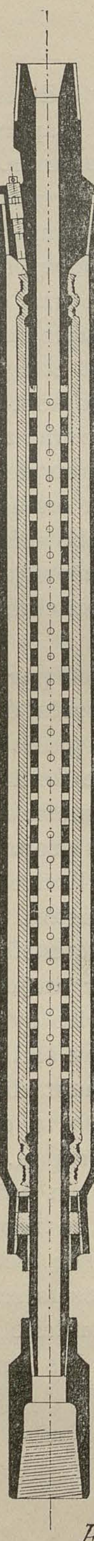


Fig. 11.

Le taraudage des joints est, presque sans exception, conique, de sorte que, malgré l'usure, ils restent toujours étanches.

Le tube de percussion, d'une longueur totale de 10 à 20 mètres, se compose de robustes tuyaux assemblés à vis coniques.

La figure 11 représente la chambre à air qui s'est le mieux comportée dans la pratique.

Une certaine partie des parois de la sonde tubulaire est perforée d'une quantité de petits trous. Une chemise de caoutchouc recouvre cette partie ; ses deux bouts sont fortement ficelés. Le tout est recouvert par un tube-enveloppe en acier dont on a pris soin d'assurer aux extrémités l'étanchéité parfaite. On introduit, par une petite soupape, de l'air sans pression entre la chemise de caoutchouc et le tuyau-enveloppe. Pendant le forage, la pression de l'eau, pression hydrostatique augmentée de celle de la pompe d'un côté, la tension de l'air de l'autre, sollicitent la chemise de caoutchouc qui, se dilatant et se contractant, constitue une cloison élastique entre l'air et l'eau.

Le bélier perforateur s'adapte aussi bien au battage ordinaire qu'à l'extraction de témoins (carottes de sondage). Afin de pouvoir retirer, d'une profondeur donnée, des échantillons de roche, sous forme de courtes carottes, il suffit de remplacer le trépan par une couronne à percussion, court tube en acier, garni sur son pourtour de dents trempées. La petite hauteur de chute, la rapidité des chocs, la manœuvre précise de la couronne, guidée par les saillies de la gaîne, facilitent la formation de bons témoins qui finissent par se coincer d'eux-mêmes dans la couronne et peuvent être remontés.

Ce procédé primitif a sa valeur incontestable, lorsqu'il ne s'agit que d'obtenir, de temps à autre, des données précises sur la nature de la roche forée, mais il ne se recommande pas comme forage continu à carottes.

Pour permettre celui-ci, l'ingénieur cité plus haut, M. E. Frieh a modifié l'appareil de manière que le tube-carottier immobile serve de guide à la couronne percutante sur plusieurs mètres de longueur. Cette disposition permet des avancements d'une longueur quelconque et l'extraction de témoins, ne le cédant point en perfection à ceux de la méthode au diamant.

RÉSULTATS PRATIQUES.

Nous croyons devoir insister sur ce fait qu'à ce jour il ne s'est produit ni rupture de tige, ni accident, ni déviation.

Les sondages effectués dans les terrains les plus difficiles (ceux des Carpathes et du Caucase) atteignent sans difficulté 900 mètres et plus. Quant à l'avancement du forage, nous croyons pouvoir affirmer que surtout dans les couches dures, il n'existe aucun autre système égalant le bélier en rapidité. Deux sondages de comparaison, exécutés en même temps, dans des terrains analogues, près de Bochum (Westphalie), l'un au bélier, l'autre à la sonde rigide puis au diamant, donnèrent les résultats suivants :

	Sonde rigide	Bélier
Nombre de postes de 12 heures nécessaire, pour atteindre la profondeur de 700 mètres.	140	106
Heures de forage effectif.	921	608
Nombre d'accidents.	36	1

Fonçage des puits au bélier.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, la force hydraulique parait appelée à actionner des batteries de perforateurs destinés au fonçage des puits. Comme le bélier constitue la seule forme connue des machines hydrauliques à percussion, c'est cette forme qui a été prise pour base de la construction d'un nouvel appareil de forage des puits.

La figure 13 est un croquis de l'appareil de ce genre, construit par la maison : Deutsche Tiefbohr-Actiengesellschaft, à Nordhausen, pour l'Exposition de Liége.

Un puits de 1 m. 70 de diamètre est attaqué par 6 trépans. Les appareils qui travaillent à la périphérie, ont reçu une position un peu oblique vers l'extérieur, de sorte que les suites fâcheuses de l'usure latérale des trépans sont éliminées et l'appareil a plutôt

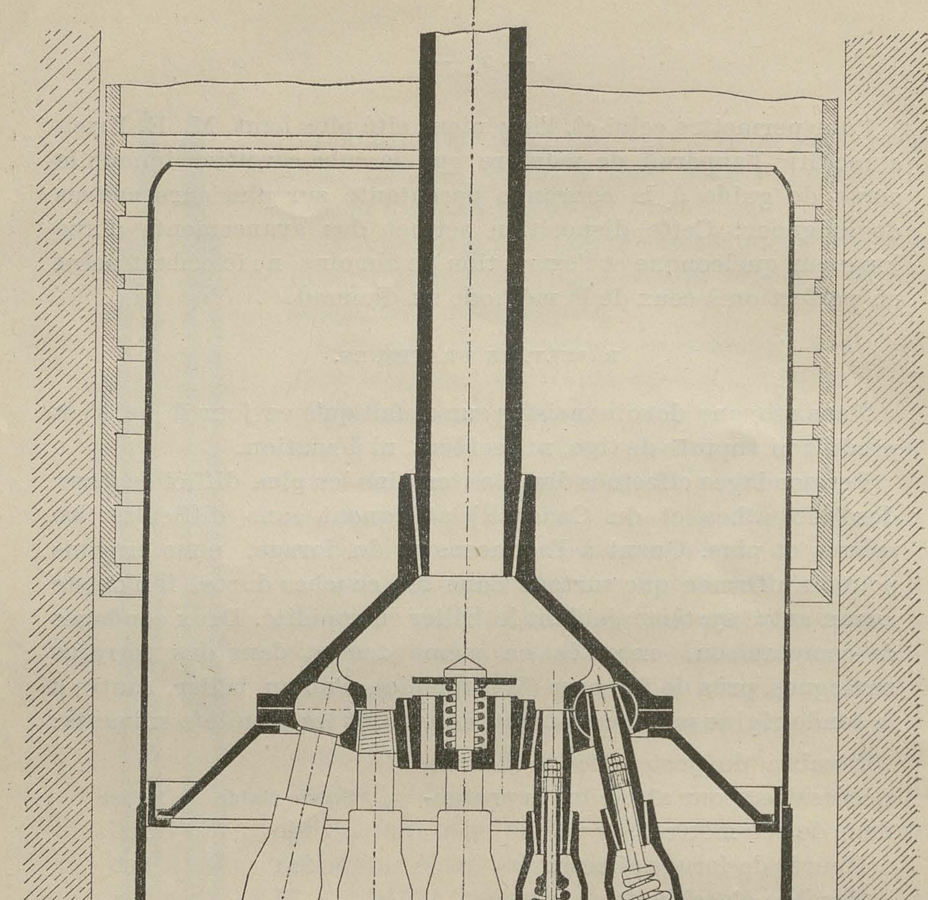


Fig.13.

une tendance à agrandir le puits. Lorsque les appareils de la périphérie sont à charnière (ainsi que la figure le montre), on obtient l'agrandissement voulu pour la descente du cuvelage.

Chaque trépan est commandé par un ressort et un piston qui lui sont propres, il n'y a que la chambre à air, le tuyau à percussion et la soupape qui soient communs (Brevet additionnel : Allemagne 135332). Le choc hydraulique commun se transmet aux pistons par les ramifications de la conduite.

Plus le diamètre du puits foré est grand, plus il nécessite de perforateurs. Il faut, naturellement, les disposer de telle façon, que chaque trépan ait à peu près la même surface de roche à attaquer.

Le principe de plusieurs trépans, activés par un choc hydraulique commun, s'applique aussi avec facilité à la construction d'un élargisseur efficace à trépans portant des coups latéraux.

Perforation mécanique.

Afin de répondre aux besoins de la perforation mécanique, le bélier doit subir quelques modifications (fig. 14). Il faut, avant tout, réaliser la rotation automatique du trépan. L'écoulement de l'eau s'effectue le mieux latéralement. On peut aussi trouver une disposition telle que le coup de bélier se donne en dehors du perforateur lui-même, auquel il transmet son effet par un système de tuyaux coudés.

Dans les travaux de tunnels où plusieurs perforatrices travaillent contre une surface commune, on établit la chambre à air, le tube à percussion et la soupape sur un chariot commun (fig. 15) ; le coup d'eau qu'ils fournissent, est transmis à chacun des pistons. La construction des appareils perforateurs est ainsi singulièrement simplifiée, de même que leur manœuvre facilitée.

Le tube à percussion, suivant l'espace disponible, peut être droit, replié ou courbe.

Le rappel du trépan dans le cylindre s'effectue, soit au moyen de ressorts d'acier, soit de fortes bandes en caoutchouc.

Ces appareils, comportent du reste, une grande diversité de types. Ainsi par exemple l'affût à colonne calé dans la galerie peut servir en même temps de chambre à air, et dans ce cas le coup de bélier est dirigé vers l'appareil au moyen d'un conduit coudé (fig. 16). Cette disposition est surtout recommandable,

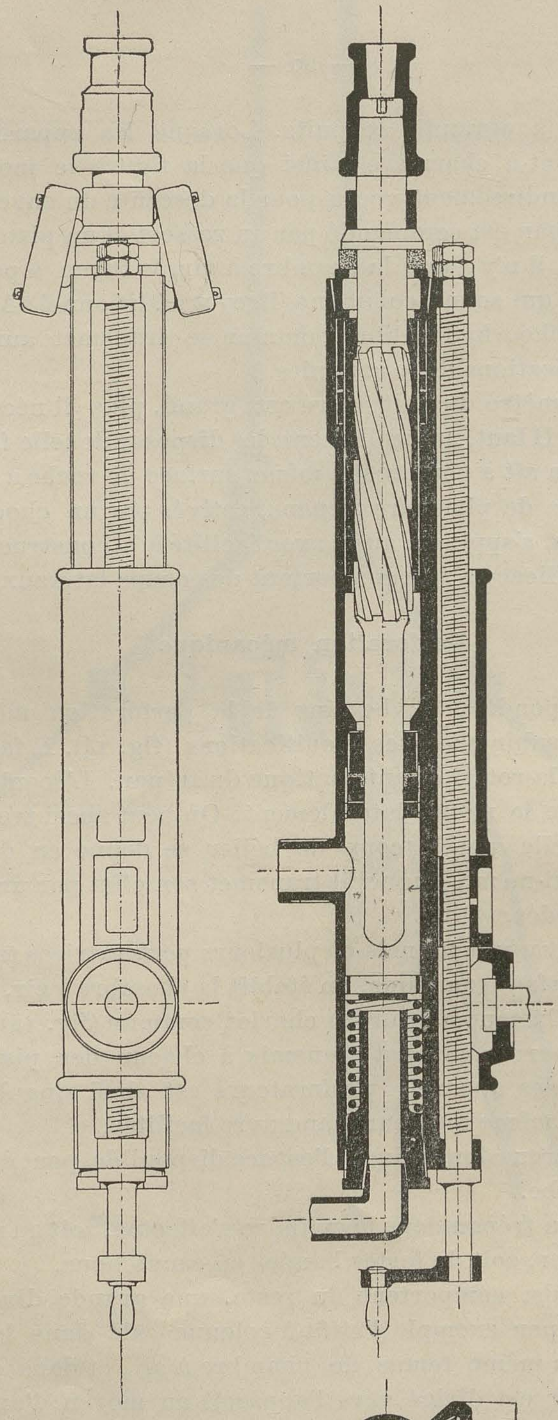


Fig. 14.

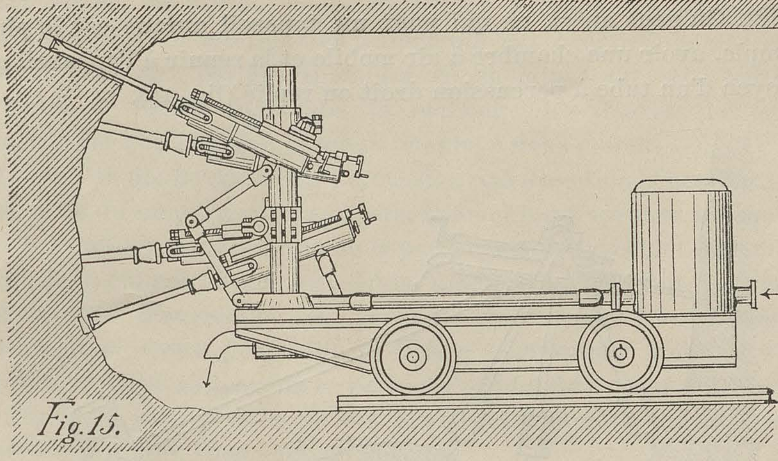


Fig. 15.

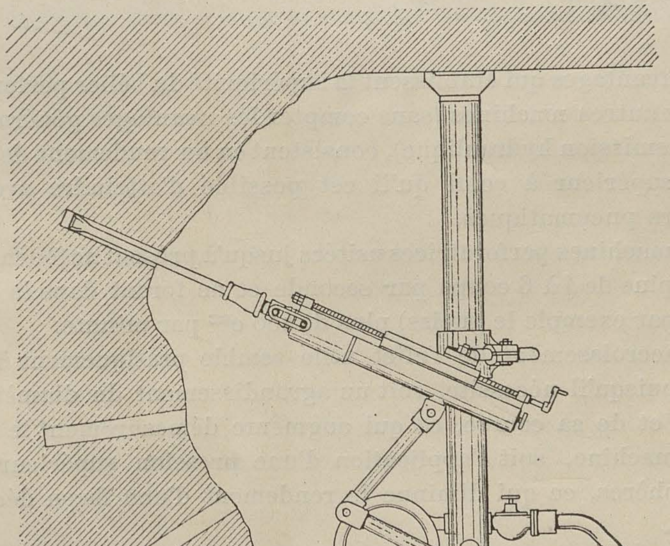


Fig. 16.

lorsque plusieurs appareils perforateurs travaillent sur le même affût. On peut aussi, ce qui pour un appareil unique est le plus simple, avoir une chambre à air mobile et la réunir à l'appareil au moyen d'un tube à percussion droit ou replié (fig. 17).

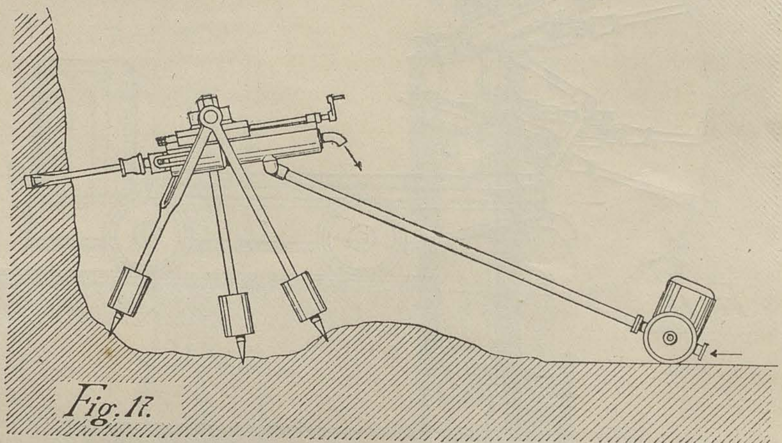


Fig. 17.

Les avantages qui établissent la supériorité du bélier perforateur sur les autres machines (sans compter les avantages généraux de la transmission hydraulique), consistent en un rendement de beaucoup supérieur à celui qu'il est possible d'atteindre avec les moteurs pneumatiques.

Les machines perforatrices usitées jusqu'à présent ne fournissent guère plus de 4 à 6 coups par seconde et ne forent dans la roche dure (par exemple le gneiss) plus de 150 c^{m3} par minute.

Un accroissement de l'effet utile semble pratiquement impossible, puisqu'il nécessite, soit un agrandissement du diamètre du piston et de sa course, ce qui augmente démesurément le poids de la machine, soit l'application d'une pression supérieure à 6 atmosphères, ce qui diminue le rendement d'une façon décourageante.

Notre appareil, au contraire, donne ordinairement 10 à 20 coups par seconde et, de plus, l'intensité de chaque coup peut être augmentée, presque sans limites, par le réglage de la soupape et de la longueur du tube de percussion.

La haute pression produite par le coup d'eau (jusqu'à 200 *atm.*) permet l'emploi d'une section réduite du piston et diminue les dimensions et le poids de l'appareil.

De même, la petite course du fleuret présente un avantage pratique. L'usure latérale des tranchants est proportionnelle au chemin parcouru par le trépan. Ici ce chemin étant très petit, la durée de l'outil augmente, la rechange des fleurets devient plus rare et l'on regagne le temps employé dans ce but.

Lorsqu'on donne au tube à percussion une direction concordante avec celle du mouvement du trépan, la machine n'éprouve presque pas de réaction, car l'énergie de la percussion se transmet directement de la colonne d'eau au piston, tandis que l'appareil ne joue que le rôle d'enveloppe et de guide par rapport aux masses percutantes. Cette propriété du bélier perforateur, jointe à sa légèreté, facilite sa fixation et permet l'emploi de légères colonnes d'affût. Les plus petites de ces machines pourront même être tenues à la main, sans support spécial.

APPENDICE.

DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES

([1]) Les deux facteurs principaux de l'effet utile : le nombre d'oscillations du trépan et la hauteur de chute se limitent mutuellement. Cependant la chute influant sur la force du choc, en raison directe de sa hauteur, et sur le nombre de coups, en raison de sa racine carrée ; un accroissement de la hauteur augmente l'effet total. (Voir mon mémoire : « Sur la hauteur de chute ». Oester. Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen 1895, Nro. 48.) Dans le système canadien, le poids de l'appareil de forage s'élève tout au plus à 900 *kg.*, la hauteur de chute à 60 *cm*, le nombre de coups à 50 par minute ; dans le forage à tige rigide, le poids de l'appareil perforateur est de 1500 *kg.*, la hauteur de chute de 15 *cm.*, le nombre de coups de 120 par minute. Si l'on prend en considération la poussée de l'eau et les autres obstacles qui s'opposent à la chute libre, on arrive à la conclusion qu'on ne peut obtenir, pratiquement au fond du puits, plus de 5 chev. vap. de puissance totale.

([2]) Supposons une colonne d'eau, divisée en une quantité de couches infiniment petites et désignons par :

λ la distance de deux sections consécutives,

μ la masse d'une des couches,

Q la section de la colonne en cm^2,

M_1 la masse du mètre courant,

Nous obtenons ($g = 10$ étant la valeur approchée de l'accélération terrestre :)

$$1) \qquad M_1 = 0.01\ Q$$

$$2) \qquad \mu = 0.01\ Q\ \lambda$$

Nommons ensuite :

c la vitesse de percussion,

A l'effort qui en résulte (exprimé en atm.).

Δl et $\Delta\lambda$ les déformations des longueurs primitives l et λ répondant à cette pression,

ε la force vive d'un élément au moment du choc,

α le travail nécessaire à réduire de $\Delta\lambda$ la distance primitive λ de deux sections consécutives, malgré la résistance élastique.

Si la colonne élastique en mouvement rencontre un obstacle fixe, la première couche s'arrête dès que sa force vive ε a été absorbée par le travail de déformation élastique α, et présente de même à partir de ce moment un obstacle fixe à la couche suivante et ainsi de suite. La compression se propage ainsi aux éléments suivants, tandis que les précédents restent comprimés.

La grandeur de cette compression est facile à évaluer, vu que α et ε sont équivalents.

$$3) \qquad \varepsilon = \frac{1}{2}\,\mu\, c^2 = 0.005\ Q\,\lambda\, c^2$$

$$4) \quad \alpha = \frac{1}{2}\, Q\, A\,.\ \Delta\lambda = 0.000024\ Q\,\lambda\, A^2$$

De l'égalité $\varepsilon = \alpha$, on obtient :

$$\text{I}) \qquad A = 14.43\ c.$$

Si l'obstacle cède avec une vitesse v, la vitesse relative du choc sera $c - v$, ce qui définit la grandeur de la pression :

$$\text{II}) \qquad A = 14.43\,(c - v).$$

Le raisonnement suivant permet de calculer la vitesse V avec laquelle l'onde élastique se propage à travers la colonne.

Supposons une couche qui était primitivement à la distance l de l'extrémité où le choc doit avoir lieu, et qui se meut avec une vitesse invariable c, jusqu'au moment où elle est atteinte par l'onde de compression. Le temps t nécessaire, pour que l'onde atteigne ce point avec la vitesse V, est :

$$5) \qquad t = \frac{l}{V}.$$

En même temps la couche a parcouru l'espace Δl avec la vitesse c, donc :

$$6) \qquad t = \frac{\Delta l}{c}$$

Eliminant t de 5) et 6) et considérant que,

$$7) \qquad \frac{\Delta l}{l} = 0.00048\, A.$$

On obtient :

$$V = 1443\ m/sec.$$

(3) Désignons par :

m la masse du trépan et de la surcharge,

v_0 la vitesse initiale de cette masse, immédiatement avant le choc (en m/sec),

v la vitesse variable de cette masse pendant les diverses phases du choc (en m/sec),

y le chemin parcouru, distance variable de la masse à l'endroit où s'est produit la première phase de la percussion (en mètres),

t le temps qui s'est écoulé depuis le commencement du choc (en sec),

Q la section de la colonne d'eau et du piston (en cm^2).

L'accélération vers le bas de la masse, sous la pression (variable) A atm., du choc hydraulique exercé sur le piston, sera :

$$8) \qquad \frac{dv}{dt} = \frac{AQ}{m} = 14.43\ \frac{Q}{m}\,(c - v)$$

d'où l'on obtient par intégration :

$$9) \qquad v = c - (c - v_0)\, e^{-14{,}43 \frac{Q}{m} t}$$

Mais puisque

$$10) \qquad v = \frac{dy}{dt}$$

une nouvelle intégration nous donne y en fonction de t et, par conséquent, l'équation du mouvement de la masse :

$$11) \quad y = ct - 0.0693 \frac{m}{Q} (c - v_0) \left(1 - e^{-14{,}43 \frac{Q}{m} t} \right)$$

(4) Désignons par :

p la superficie du clapet (en cm^2),

o sa circonférence (en cm),

x_0 la distance normale du clapet, distance du siège, quand le ressort du clapet n'est pas chargé (en *cm.*),

x la valeur variable de cette distance, lorsque le ressort est progressivement comprimé (en *cm.*),

a la surcharge (variable) exercée sur le clapet (en *atm.*),

y la pression de l'eau sur le clapet (en *kg.*),

z la résistance opposée par le ressort à la pression de l'eau (en *kg.*),

w la quantité (variable) d'eau, qui traverse la soupape au moment donné (en *l/sec*),

u la vitesse (variable) de l'eau dans la plus étroite section de la soupape (en *m/sec*).

La section d'écoulement par la soupape (rétrécie par le clapet) en cm^2 est:

$$12) \qquad q = o\, x$$

La vitesse de l'eau dans cet étranglement est :

$$13) \qquad u = 10 \frac{w}{ox}.$$

Pour que l'eau atteigne cette vitesse, il faut qu'elle reçoive une surcharge dont la valeur suivant les lois connues de l'hydrodynamique est (en atm.).

$$14) \qquad a = \frac{1}{10} \frac{u^2}{2g} = \frac{1}{2} \frac{w^2}{o^2} \frac{1}{x^2}.$$

(Ici on a négligé, pour simplifier les calculs, la vitesse insignifiante de l'eau avant la section rétrécie).

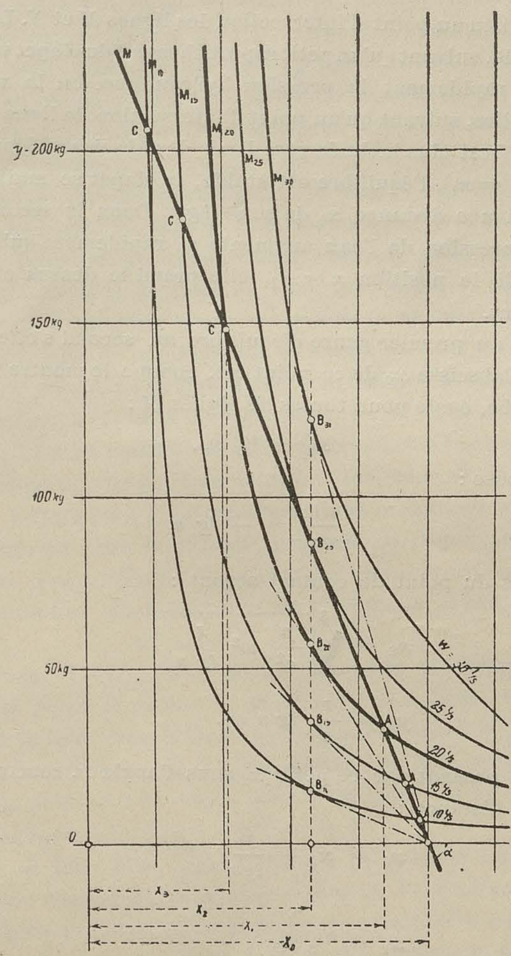
A la surcharge a correspond un développement d'effort sur le clapet :

$$15) \qquad y = \frac{1}{2} \frac{p}{o^2} w^2 \frac{1}{x^2}.$$

Cette équation donne la relation entre la distance du clapet et la pression correspondante de l'eau. Elle est représentée graphiquement (fig. 7) par une

série de courbes homologues M_{10}, M_{15}, M_{20}, etc., correspondant aux diverses valeurs du paramètre (*w = 10 l/sec, 15 l/sec, 20 l/sec* etc).

Fig. 7.



Le ressort de la soupape réagit contre la pression de l'eau. Sa résistance z est proportionnelle à la déformation et se présente, pour cette raison, dans le diagramme, sous forme d'une droite inclinée N. Lors de la position primitive du clapet ($x = x_0$), le ressort n'exerce aucune pression. A mesure qu'il est comprimé jusqu'à une certaine valeur x de plus en plus petite, sa résistance z augmente et la relation constante qui existe entre la résistance et la déformation :

$$16) \qquad \frac{z}{x - x_0} = tg\, a$$

donne la mesure de la force de ce ressort.

Il y a équilibre entre la pression de l'eau et le ressort,

$$17) \qquad \text{quand} \qquad z = y.$$

C'est ce qui a lieu au point d'intersection des lignes M et N. L'équilibre est stable ou instable, suivant qu'un petit rapprochement du clapet vers son siège, augmente plus rapidement la pression hydraulique, ou la résistance du ressort; c'est-à-dire, suivant qu'au point d'intersection, la ligne courbe M ou la ligne droite N est plus inclinée vers l'axe des abscisses. Dans le premier cas (point A, $x = x_1$), l'équilibre est stable, le clapet se maintient dans le courant d'eau à une distance x_1 de son siège. Dans le second cas (point C, $x = x_3$), la pression de l'eau augmente si rapidement qu'à la moindre transgression de la position $x = x_3$, elle prend le dessus et le clapet se ferme subitement.

La transition du premier genre d'équilibre au second s'effectue au point de contact B. L'abscisse x_2 de ce point est, comme le montre l'équation 15) de la ligne courbe, égale pour toutes les lignes M :

$$x_2 = {}^2/_3\, x_0.$$

Car si l'on pose :

$$18) \qquad \frac{dy}{dx} = -\, tg\, a$$

les coordonnées du point de contact seront :

$$19) \qquad x_2 = \sqrt[3]{\frac{p}{o^2}\, w^2\, \frac{1}{tg\, a}}$$

$$20) \qquad y_2 = \frac{1}{2}\, tg\, a\, x_2.$$

La tangente, passant par ce point x_2 sous l'angle a, rencontre l'axe des abscisses à une distance :

$$21) \qquad x_0 = x_2 + \frac{y_2}{tga}$$

ce qui donne :

$$22) \qquad x_2 = {}^2/_3\, x_0.$$

([5]) La force vive du choc est donnée par la vitesse c_2 que possédait la colonne d'eau en mouvement, immédiatement avant la fermeture de la soupape. Cette vitesse se déduit de la quantité d'eau w_2, répondant à la courbe M, à laquelle la ligne droite N est tangente.

$$23) \qquad c_2 = 10\, \frac{w_2}{Q}$$

Dans le cas présent (Fig. 7) par ex. w_2, $= 25\ l/sec.$

Étant donné la valeur de la distance normale x_0, les valeurs de la section ibre d'écoulement, précédant immédiatement la fermeture de la soupape, $(q_2 = {}^2/_3\ o\ x_0)$, ainsi que celles de la déformation du ressort $(d_2 = {}^1/_3\ x_0)$ sont toujours les mêmes et ne dépendent pas de la force du ressort. Mais un ressort plus puissant exigera, pour la même déformation, une plus grande surcharge d'eau, ainsi qu'une plus grande vitesse du courant, vitesse augmentant en raison directe de la racine carrée de la surcharge. Par conséquent, la force vive de la percussion est en raison directe de la puissance du ressort.

Par contre, la distance normale x_0, le ressort restant le même, influe sur la force du choc, en raison de son cube; car lorsque x_0 augmente, la section libre transversale d'écoulement s'accroit aussi (en raison directe), ainsi que la vitesse d'écoulement de l'eau (en raison de sa racine carrée) ; par conséquent la quantité d'eau w_2 augmente en raison de la puissance $1\,{}^1/_2$, a [illegible] vive de la percussion en raison du cube de x_0.

(6) On peut [illegible]éfinir, au moyen d'une construction graphique, la longueur la plus avantageuse du tube de percussion, en se servant du diagramme du travail (Fig. 6 III.) Considérant qu'ici les abscisses (représentant la durée de la percussion) sont proportion[illegible]elles à la longueur du tube et, par conséquent aussi, à l'énergie totale con[illegible]enue dans la colonne d'eau, et que les ordonnées représentent le travail transmis au trépan, il s'ensuit que le rapport entre l'ordonnée et l'abscisse de cette courbe mesure, en même temps, la quantité de force vive de la colonne d'eau transformée en travail utile.

Plus ce rapport est grand, mieux cela vaut. Il devient le plus favorable pour le point K, point de tangence d'une droite tirée du point O. A ce moment le choc devrait finir. Quand la construction et les dimensions sont exactes, on trouve, que la transmission la plus efficace du travail a lieu, quand le poids de l'eau égale celui du trépan.

(7) Le raisonnement suivant le démontre :

Si Q_1 est a fois plus grand que Q, la pression du choc hydraulique exercée à chaque instant sur le piston et l'accélération de la masse, sont a fois plus grandes. Mais puisque d'autre part à chaque mouvement d'un plus grand piston correspond aussi une vitesse de la colonne d'eau a fois plus grande, la percussion hydraulique s'effectue dans la conduite de même manière que si, Q égalant Q_1, la masse du trépan était a^2 fois moindre.

(8) La formule exacte est :

$$\frac{E_2}{E} = 1 - \frac{A_2}{A} \cdot \frac{1}{log\ nat\ \frac{A}{A - A_2}}.$$